(19)日本国特許庁(JP)　(12)**公表特許公報(A)**　(11)特許出願公表番号

特表2020-521645
(P2020-521645A)

(43)公表日　**令和2年7月27日(2020.7.27)**

(51)Int.Cl.　F I　テーマコード（参考）
B25J 19/06 (2006.01)　B25J 19/06　3C707

審査請求 有　予備審査請求 未請求　（全 25 頁）

(21)出願番号　特願2019-566299(P2019-566299)
(86)(22)出願日　平成30年5月29日(2018.5.29)
(85)翻訳文提出日　令和2年1月29日(2020.1.29)
(86)国際出願番号　PCT/EP2018/064075
(87)国際公開番号　WO2018/219952
(87)国際公開日　平成30年12月6日(2018.12.6)
(31)優先権主張番号　102017005080.5
(32)優先日　平成29年5月29日(2017.5.29)
(33)優先権主張国・地域又は機関
ドイツ(DE)

(71)出願人　517372139
フランカ　エミカ　ゲーエムベーハー
ＦＲＡＮＫＡ　ＥＭＩＫＡ　ＧｍｂＨ
ドイツ連邦共和国　８０７９７　ミュンヘン、フライ－オットー－シュトラッセ　２０
(74)代理人　100122426
弁理士　加藤　清志
(72)発明者　ハダディン、ザミ
ドイツ連邦共和国　３０１７３　ハノーバー、アルテ　デーレナー　シュトラーセ　５０ｄ
(72)発明者　フォーンダーメ、ヨナタン
ドイツ連邦共和国　８０８０９　ミュンヘン、セイラーシュトラーセ　１４

最終頁に続く

(54)【発明の名称】ロボットによる衝突処理

(57)【要約】

本発明は、少なくとも１つの運動連鎖を含む運動連鎖構造を有するロボット（１）の衝突処理方法に関し、運動連鎖構造は、ベース、リンク、リンクを接続する関節、アクチュエータおよび少なくとも１つのエンドエフェクタ、力／トルクを測定／推定するため少なくとも１つの運動連鎖の最も遠位のリンクにあるセンサ $S_{distal.i}$、および固有受容データを測定／推定するためのセンサ S_i で構成され、センサ S_i は、運動連鎖構造に沿って任意に配置され、この方法は、

- ロボット（１）のダイナミクスを記述するモデルを提供（Ｓ１）し、
- 少なくとも１つの運動連鎖の最も遠位のリンクで、センサ $S_{distal.i}$ で力／トルク $F_{ext,S,distal.i}$ を測定および／または推定（Ｓ２）し、
- センサ S_i により固有受容データ：ベースおよびロボットの一般化座標 $q(t)$ およびそれらの時間微分 $\dot{q}(t)$、一般化関節モーター力 τ_m、外力 F_S、ベース方位 $\varphi_B(t)$ およびベース速度 $\dot{x}(t)_B$、を測定および／または推定（Ｓ３）し、
- 固有受容データおよびモデルの少なくとも１つに基づいて、運動量オブザーバ３で一般化外力 τ_{ext} の推定値 $\hat{\tau}_\epsilon$ を生成（Ｓ４）し、
- $\hat{\tau}_\epsilon$ および τ_m に基づいて、ベースおよびロボットの一般化座標 $\ddot{q}(t)$ の２次導関数の推定値 $\hat{\ddot{q}}(t)$ を生成（Ｓ５）し、
- $\hat{\ddot{q}}(t)$ に基づいて、運動連鎖構造上の点 D のデカルト加速度 $\hat{\ddot{x}}_D$ を推定（Ｓ６）し、
- 推定外部レンチ $\hat{F}_{ext,S.i}$ を取得するため、$\hat{\ddot{x}}_D$ に基づく剛体力学効果および重力効果に対して F_S を補正（Ｓ７）し、
- 予期しない衝突から生じる一般化関節力の推定 $\hat{\tau}_{ext,col}$ を取得するため、ヤコビアン $J^T_{S.distal.i}$ 変換された $F_{ext,S,distal.i}$ に対して $\hat{\tau}_\epsilon$ を補正（Ｓ８）し、
- $\hat{\tau}_{ext,col} > \tau_{thresh}$ および／または $\hat{F}_{ext,S.i} > F_{S.i,thresh}$ の場合、与えられた閾値 τ_{thresh} および $F_{S.i,thresh}$ に基づいて衝突を検出（Ｓ９）する、

ステップを含む。

【選択図】図３

【特許請求の範囲】

【請求項１】

少なくとも１つの運動連鎖を含む運動連鎖構造を有するロボット（１）の衝突処理方法であり、前記運動連鎖構造は、ベース、リンク、リンクを接続する関節、アクチュエータおよび少なくとも１つのエンドエフェクタ、力／トルクを測定／推定するため少なくとも１つの前記運動連鎖の最も遠位のリンクにあるセンサ $S_{distal.i}$、および固有受容データを測定／推定するためのセンサ S_i で構成され、前記センサ S_i は、前記運動連鎖構造に沿って任意に配置され、この方法は、

- 前記ロボット（１）のダイナミクスを記述するモデルを提供（Ｓ１）し、
- 少なくとも１つの前記運動連鎖の最も遠位のリンクにおいて、センサ $S_{distal.i}$ により力／トルク $F_{ext,S.distal.i}$ を測定および／または推定（Ｓ２）し、
- 前記センサ S_i により固有受容データ：ベースおよびロボットの一般化座標 $q(t)$ およびそれらの時間微分 $\dot{q}(t)$、一般化関節モーター力 τ_m、外力 F_S、ベース方位 $\varphi_B(t)$ およびベース速度 $\dot{x}(t)_B$、を測定および／または推定（Ｓ３）し、
- 前記固有受容データおよびモデルの少なくとも１つに基づいて、運動量オブザーバ（３）により一般化外力 τ_{ext} の推定値 $\hat{\tau}_\epsilon$ を生成（Ｓ４）し、
- $\hat{\tau}_\epsilon$ および τ_m に基づいて、ベースおよびロボットの一般化座標 $\ddot{q}(t)$ の２次導関数の推定値 $\hat{\ddot{q}}(t)$ を生成（Ｓ５）し、
- $\hat{\ddot{q}}(t)$ に基づいて、前記運動連鎖構造上の点 D のデカルト加速度 $\hat{\ddot{x}}_D$ を推定（Ｓ６）し、
- 推定外部レンチ $\hat{F}_{ext,S.i}$ を取得するため、$\hat{\ddot{x}}_D$ に基づく剛体力学効果および重力効果に対して F_S を補正（Ｓ７）し、
- 予期しない衝突から生じる一般化関節力の推定 $\hat{\tau}_{ext,col}$ を取得するため、ヤコビアン $J^T_{S.distal.i}$ 変換された $F_{ext,S.distal.i}$ に対して $\hat{\tau}_\epsilon$ を補正（Ｓ８）し、
- $\hat{\tau}_{ext,col} > \tau_{thresh}$ および／または $\hat{F}_{ext,S.i} > F_{S.i,thresh}$ の場合、与えられた閾値 τ_{thresh} および $F_{S.i,thresh}$ に基づいて衝突を検出（Ｓ９）する、

ステップを含む、方法。

【請求項２】

推定外部レンチ $\hat{F}_{ext,S.i}$ を取得するため、デカルト加速度 $\hat{\ddot{x}}_D$ に基づく剛体力学効果および重力効果に対して前記外力 F_S を補正するための補正レンチは、複数のセンサ S が関節またはリンクのいずれかに接続されている場合に再帰的に生成される、請求項１に記載の方法。

【請求項３】

- 衝突の $r_d = (S^T(f_i))^\# m_i$ で、力の作用線 $r_d + \lambda f_i / || f_i ||$ を計算し、および前記力の作用線と前記運動連鎖構造のジオメトリを交差させることで、前記運動連鎖構造との衝突の接触位置 r_C を決定（Ｓ１０）するステップ、を更に含む、請求項１または請求項２のいずれか一項に記載の方法。

【請求項４】

- 決定された前記接触位置 r_C に基づいて、完全な接触ヤコビアン $J_{C.i} = J_{c,i} J_i$ を決定（Ｓ１１）し、
- 外部レンチ：$(F^T_{ext,1} \ldots F^T_{ext,n})^T = (J^T_{C.1} \ldots J^T_{C.n})^\# \tau_{ext,col}$ を決定（Ｓ１２）するステップ、を更に含む、請求項３に記載の方法。

【請求項５】

- r_C および $(F^T_{ext,1} \ldots F^T_{ext,n})^T$ に依存する前記ロボット（１）を制御（Ｓ１３）する、請求項２～請求項４のいずれか一項に記載の方法。

【請求項６】

前記ロボット（１）はヒューマノイドロボットである、請求項１～請求項５のいずれか 50

一項に記載の方法。
【請求項７】
データ処理ユニットを備えたコンピュータシステムであって、前記データ処理ユニットは、請求項１～請求項６のいずれか一項に記載の方法を実行するように設計および設定される、コンピュータシステム。
【請求項８】
制御信号は、プログラム可能なコンピュータシステムと共働することができ、それにより、請求項１～請求項７のいずれか一項に記載の方法を実行することができる、電子的に読み取り可能な前記制御信号を備えたデジタルデータストレージ。
【請求項９】
プログラムコードがコンピュータシステム上で実行される場合、請求項１～請求項８のいずれか一項に記載の方法を実行するための機械可読媒体に格納された前記プログラムコードを含むコンピュータプログラムプロダクト。
【請求項１０】
コンピュータプログラムがコンピュータシステム上で実行される場合、請求項１～請求項９のいずれか一項に記載の方法を実行するためのプログラムコードを有するコンピュータプログラム。
【請求項１１】
少なくとも１つの運動連鎖を含む運動連鎖構造を有するロボット（１）であり、前記運動連鎖構造は、ベース、リンク、リンクを接続する関節、アクチュエータ、および少なくとも１つのエンドエフェクタ、力／トルクを測定／推定するため、少なくとも１つの前記運動連鎖の最遠位リンクにあるセンサ $S_{distal, i}$、および固有受容データを測定／推定するためのセンサ S_i で構成され、前記センサ S_i は前記運動連鎖構造に沿って任意に配置され、前記ロボット（１）は請求項１～請求項１０のいずれか一項に記載の方法を実行するように設計および設定されている、ロボット（１）。

【請求項１２】
前記ロボット（１）は、データネットワークとのデータインターフェースを備え、前記ロボット（１）は、前記データネットワークから前記ロボット（１）を設定および制御するためのシステムプログラムをダウンロードするように設計および設定される、請求項１１に記載のロボット（１）。
【請求項１３】
前記ロボット（１）は、前記データネットワークから前記システムプログラムのパラメータをダウンロードするように設計および設定される、請求項１１または請求項１２のいずれか一項に記載のロボット（１）。
【請求項１４】
前記ロボット（１）は、ローカル入力インターフェースおよび／またはティーチインプロセスを介して前記システムプログラムのパラメータを入力するように設計および設定され、前記ロボット（１）は手動で誘導される、請求項１１～請求項１３のいずれか一項に記載のロボット（１）。
【請求項１５】
前記ロボット（１）は、前記データネットワークからのシステムプログラムおよび／またはそれぞれのパラメータのダウンロードが遠隔基地によって制御されるように設計および設定され、前記遠隔基地は前記データネットワークの一部である、請求項１１～請求項１４のいずれか一項に記載のロボット（１）。
【請求項１６】
前記ロボット（１）は、前記ロボット（１）でローカルに利用可能なシステムプログラムおよび／またはそれぞれのパラメータが、前記データネットワークから受信したそれぞれの要求に基づいてデータネットワークの１人以上の参加者に送信されるように設計および設定される、請求項１１～請求項１５のいずれか一項に記載のロボット（１）。

【請求項１７】
　前記ロボット（１）は、前記ロボット（１）でローカルに利用可能なそれぞれのパラメータを有するシステムプログラムが遠隔基地から開始できるように設計および設定され、前記遠隔基地は前記データネットワークの一部である、請求項１１～請求項１６のいずれか一項に記載のロボット（１）。
【請求項１８】
　前記ロボット（１）は、前記遠隔基地および／または前記ローカル入力インターフェースが、システムプログラムおよびそれぞれのパラメータの入力のためおよび／または多数のシステムプログラムとそれぞれのパラメータからシステムプログラムとそれぞれのパラメータを選択するために設計および設定されたヒューマンマシンインターフェースＨＭＩを含むように設計および設定される、請求項１１～請求項１７のいずれか一項に記載のロボット（１）。
【請求項１９】
　前記ヒューマンマシンインターフェースＨＭＩは、タッチスクリーンでの「ドラッグアンドドロップ」入力を介して、誘導ダイアログ、キーボード、コンピュータマウス、触覚インターフェース、仮想現実インターフェース、拡張現実インターフェース、音響インターフェース、身体追跡インターフェースを介して、筋電データに基づいて、脳波データに基づいて、神経インターフェースを介して、またはそれらの組み合わせを介してエントリが可能になるように設計および設定される、請求項１８に記載のロボット（１）。
【請求項２０】
　前記ヒューマンマシンインターフェースＨＭＩは、聴覚的、視覚的、触覚的、嗅覚的、触知的、または電気的フィードバック、またはそれらの組み合わせを提供するように設計および設定される、請求項１８または請求項１９に記載のロボット（１）。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
　本発明は、ロボットの衝突処理方法、およびこの方法を実行するように設計および構成されたロボットに関する。
【０００２】

通常、操作タスクを実行するヒューマノイドロボットは、複数の接点で環境と接触している。ロボットは、接地接触を介して足で、および所望の操作タスクを実行するために手でその環境に接触している。膝での衝突物との望ましくない接触などの、望ましくない衝突に正しく反応するために、ロボットは衝突を検出し、接触状況を分析し、それに応じて反応する能力を持たなければならない。要約すると、衝突を検出、分離、特定する必要がある。マニピュレータの衝突検出の問題に対するアプローチはいくつか存在する。非特許文献[22]、[19]では、モデルに基づいた基準トルクが、モーター電流を介して測定されたアクチュエータトルクと比較される。非特許文献[12]は、適応インピーダンスコントローラで同様のアプローチを使用する。非特許文献[20]は関節間の連結を無視して、関節ごとに外乱トルクを観察する。上記の方法はすべて、衝突検出に時不変の閾値を使用する。推定モデル化誤差に基づく時変閾値を使用したアプローチは非特許文献[17]、[16]にあり、一般化された運動量ベースのオブザーバを使用して、関節の外乱トルク、また、モデル化誤差の境界を推定する。前述のすべての方法の欠点は、一般に高いノイズが発生する、つまり、加速度測定が必要となる。通常、接触位置を見つける為のアプローチ（衝突分離）は、触覚スキンを利用する非特許文献[2]、[11]、[10]、[18]。適切な触覚スキンにより、接触位置を正確かつ確実に見つけることができる。ただし、追加のセンサーを必要とせずに、固有受容感知のみを使用して、できることが望ましい。衝突の特定は、外部接触レンチF_{ext}および外部の一般化関節力τ_{ext}を求めることを目的としている。固定ベースのシリアルリンクロボットの外部関節トルク推定は非特許文献[6]で提案され、非特許文献[3]のＤＬＲ（ドイツ航空宇宙センター）軽量ロボットにて柔軟関節ロボットに拡張および検証された。これは、衝突を検出し、接触位置を見つけ、外部トルクを推定する、つまり、衝突処理問題の最初の３つのフェーズを同時に解決する最初の方法であった。このアプローチは、加速度の測定に依存しない、一般化された運動量ベースの外乱オブザーバの減結合特性を利用する非特許文献[4]、[9]。コンタクトレンチはしばしば、力／トルクセンサの助けを借りて決定される。非特許文献[14]は、測定された足の力を直接除外した、一般化された運動量ベースの外乱オブザーバを使用して、ヒューマノイドロボット*ＴＯＲＯ*の操作から生じる外部関節トルクのみを推定する。接触力推定のために、手での接触が想定される。非特許文献[8]では、ヒューマノイドロボットの足での接地接触力は、所望の総加力に基づいて最適な負荷分散アプローチで推定される。ＮＡＳＡロボット「ヴァルキリー」の場合、これらは足首にある力／トルクセンサで測定される非特許文献[15]。

【先行技術文献】
【非特許文献】
【０００３】
上記の先行技術のソースおよび追加のソースは次のとおりである。

【非特許文献１】[1] K. Bouyarmane and A. Kheddar. On the dynamics modeling of free-floating-base articulated mechanisms and applications to humanoid whole-body dynamics and control. Humanoids, 2012.
【非特許文献２】[2] R. S. Dahiya, P. Mittendorfer, M. Valle, et al. Directions toward effective utilization of tactile skin: A review. IEEE Sensors Journal, 2013.
【非特許文献３】[3] A. De Luca, A. Albu-Scha¨ffer, S. Haddadin, and G. Hirzinger. Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm. In IROS, 2006.
【非特許文献４】[4] A. De Luca and R. Mattone. Actuator failure detection and isolation using generalized momenta. In ICRA, 2003.
【非特許文献５】[5] A. De Luca and R. Mattone. An adapt-and-detect actuator fdi scheme for robot manipulators. In ICRA, 2004.
【非特許文献６】[6] A. De Luca and R. Mattone. Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control. In ICRA, 2005.

40

50

【非特許文献７】[7] S. Haddadin. Towards Safe Robots. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
【非特許文献８】[8] S.-H. Hyon, J. Hale, and G. Cheng. Full-body compliant human- humanoid interaction: Balancing in the presence of unknown external forces. IEEE Trans. Robot., 2007.
【非特許文献９】[9] H.-B. Kuntze, C. Frey, K. Giesen, and G. Milighetti. Fault tolerant supervisory control of human interactive robots. In IFAC Workshop on Advanced Control and Diagnosis, 2003.
【非特許文献１０】[10] V. J. Lumelsky and E. Cheung. Real-time collision avoidance in tele- operated whole-sensitive robot arm manipulators. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1993.
【非特許文献１１】[11] G. D. Maria, C. Natale, and S. Pirozzi. Force/tactile sensor for robotic applications. Sensors and Actuators A: Physical, 2012.
【非特許文献１２】[12] S. Morinaga and K. Kosuge. Collision detection system for manipu- lator based on adaptive impedance control law. In ICRA, 2003.
【非特許文献１３】[13] Open Source Robotics Foundation. ”DRC simulator”, https://bitbucket.org/osrf/drcsim. [Online], 2015.
【非特許文献１４】[14] C. Ott, B. Henze, and D. Lee. Kinesthetic teaching of humanoid motion based on whole-body compliance control with interaction- aware balancing. In IROS, 2013.
【非特許文献１５】[15] N. A. Radford, P. Strawser, K. Hambuchen, et al. Valkyrie: Nasa’s first bipedal humanoid robot. Journal of Field Robotics, 2015.
【非特許文献１６】[16] V. Sotoudehnejad and M. R. Kermani. Velocity-based variable thresh- olds for improving collision detection in manipulators. In ICRA, 2014.
【非特許文献１７】[17] V. Sotoudehnejad, A. Takhmar, M. R. Kermani, and I. G. Polushin. Counteracting modeling errors for sensitive observer-based manipula- tor collision detection. In IROS, 2012.
【非特許文献１８】[18] M. Strohmayr. Artificial Skin in Robotics. PhD thesis, Karlsruhe Institute of Technology, 2012.
【非特許文献１９】[19] K. Suita, Y. Yamada, N. Tsuchida, et al. A failure-to-safety “kyozon” system with simple contact detection and stop capabilities for safe human-autonomous robot coexistence. In ICRA, 1995.
【非特許文献２０】[20] S. Takakura, T. Murakami, and K. Ohnishi. An approach to collision detection and recovery motion in industrial robot. In IECON, 1989.
【非特許文献２１】[21] J. Vorndamme, M. Schappler, A. Todtheide, and S. Haddadin. Soft robotics for the hydraulic Atlas arms: Joint impedance control with collision detection and disturbance compensation. In IROS, 2016. Accepted and publicly available October 2016. Initial submission:https://www.irt.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/tmp/VorndammeSchToeHad2016.pdf.
【非特許文献２２】[22] Y. Yamada, Y. Hirasawa, S. Huang, et al. Human-robot contact in the safeguarding space. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1997.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００４】

本発明の課題は、ロボット、特にヒューマノイドの、より効果的な、衝突の検出から識別まで、および分離を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【０００５】

本発明の第１の態様は、少なくとも１つの運動連鎖を含む運動連鎖構造を有するロボットの衝突処理方法に関し、運動連鎖構造は、ベース、リンク、リンクを接続する関節、アクチュエータおよび少なくとも１つのエンドエフェクタ、力／トルクを測定／推定するため少なくとも１つの運動連鎖の最遠位リンクにあるセンサ $S_{distal.i}$、および固有受容データを測定／推定するためのセンサ S_i、で構成され、センサ S_i は、運動連鎖構造に沿って任意に配置され、この方法は、

- ロボットのダイナミクスを記述するモデルを提供し、
- 少なくとも１つの運動連鎖の最も遠位のリンクで、センサ $S_{distal.i}$ で力／トルク $F_{ext,S.distal.i}$ を測定および／または推定し、
- センサ S_i により固有受容データ：ベースおよびロボットの一般化座標 $q(t)$ およびそれらの時間微分 $\dot{q}(t)$、一般化関節モーター力 τ_m、外力 F_S、ベース方位 $\varphi_B(t)$ およびベース速度 $\dot{x}(t)_B$、を測定および／または推定し、
- 固有受容データおよびモデルの少なくとも１つに基づいて、運動量オブザーバで一般化外力 τ_{ext} の推定値 $\hat{\tau}_\epsilon$ を生成し、
- $\hat{\tau}_\epsilon$ および τ_m に基づいて、ベースおよびロボットの一般化座標 $\ddot{q}(t)$ の２次導関数の推定値 $\hat{\ddot{q}}(t)$ を生成し、
- $\hat{\ddot{q}}(t)$ に基づいて、運動連鎖構造上の点 D のデカルト加速度 $\hat{\ddot{x}}_D$ を推定し、
- 推定外部レンチ $\hat{F}_{ext,S.i}$ を取得するため、$\hat{\ddot{x}}_D$ に基づく剛体力学効果および重力効果に対して F_S を補正し、
- 予期しない衝突から生じる一般化関節力の推定 $\hat{\tau}_{ext,col}$ を取得するため、ヤコビアン $J^T_{S.distal.i}$ 変換された $F_{ext,S.distal.i}$ に対して $\hat{\tau}_\epsilon$ を補正し、および、
- $\hat{\tau}_{ext,col} > \tau_{thresh}$ および／または $\hat{F}_{ext,S.i} > F_{S.i,thresh}$ の場合、与えられた閾値 τ_{thresh} および $F_{S.i,thresh}$ に基づいて衝突を検出する、

ステップを含む。

【０００６】

いくつかの場合、上記および以下で実行中のインデックス i が使用される。当業者は、有限集合の要素の数も「１」であり得るが、複数の有限集合または場合によっては無限集合のそれぞれの要素を示すための記述としてこれを理解する。特に、i がロボットと外部オブジェクトとの衝突のそれぞれの番号付けを参照し、i=1 が成り立つ場合にのみ常に、それは１つの衝突しかないことを意味する。i が i=1 または i=2 の場合、２つの衝突が参照される。同じことは、衝突の番号付けを超えて、センサなどの番号付けにも適用される。

【０００７】

ロボットのダイナミクスを記述するモデルには、特に質量に関する情報、特に運動連鎖構造に沿った質量分布が含まれる。後者から、運動連鎖構造の慣性モーメントも知られている。

【０００８】

ロボットは、好ましくはヒューマノイドロボットであり、好ましくは次のようにモデル化される：

$$\begin{pmatrix} M_{BB} & M_{BJ} \\ M_{JB} & M_{JJ} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \ddot{q}_B \\ \ddot{q}_J \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} C_B(\dot{q}) \\ C_J(\dot{q}) \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{q}_B \\ \dot{q}_J \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} g_B \\ g_J \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{Jm} \end{pmatrix}-\begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{Jf} \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} \tau_{Bext} \\ \tau_{Jext} \end{pmatrix}$$ 式（１）

ここで、$q_B=(r_b\varphi_B)^T$および$q=(q_b q_J)^T$は、デカルトのベース位置$r_B\in\mathbb{R}^3$オイラー角のベース方位$\varphi_B\in\mathbb{R}^3$および関節角$q_J\in\mathbb{R}^{n_J}$からなるベースおよびロボット一般化座標を示す。ベースおよび関節エントリは、印「Ｂ」と「Ｊ」で示されている。さらに、式（１）はよりコンパクトな形式で記述されうる：

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+g(q)=\tau_m-\tau_f+\tau_{ext}$$ 式（２）

ここで、$M(q)$は質量行列、$C(q,\dot{q})$は遠心およびコリオリ項の行列、$g(q)$は重力ベクトルであり、qへの依存性は式（１）の簡潔さのために省略されており、簡潔にするために、$q(t)$とその時間導関数は、qおよび$\dot{q}$などとして短く記述される。ベクトルτ_m,τ_fとτ_{ext}は、一般化されたモーター関節力、摩擦関節力、および外部関節力を示す。デカルト力f_Bおよびモーメントm_Bは、$\omega_B=J_\omega(\varphi_B)\dot{\varphi}_B$の角速度ヤコビアン$J_\omega$で、ベース一般化回転座標に投影される。一般化外力$F_{ext,i}$は、接触点$r_{C.i}$の対応する幾何学的浮動ベースヤコビアン$J_{C.i}$を介して一般化関節力

$$\tau_{ext,i}=\begin{pmatrix} \tau_{B,ext,i} \\ \tau_{J,ext,i} \end{pmatrix}=J_{C.i}^T F_{ext,i}=\begin{pmatrix} I_3 & -S(r_{BC.i})J_\omega & RJ_{JtC.i} \\ 0 & J_\omega & RJ_{JRC.i} \end{pmatrix}^T\begin{pmatrix} f_{ext,i} \\ m_{ext,i} \end{pmatrix}$$ 式（３）

に投影され、ここで、$J_{JtC.i}$および$J_{JRC.i}$は、対応する関節ヤコビアンの並進および回転部分行列であり、Rはロボットベースからワールドフレームへの回転行列である。非特許文献[14]および[1]を参照。

【００09】

運動連鎖構造は、好ましくは、関節トルク感知と、運動連鎖構造に沿って任意に配置された力／トルクを測定するための任意の数のセンサ S_i を含む。さらに、ベース方位φ_Bおよび一般化ベース速度$\dot{x}_B$を測定できる。一般的な目的は、外部オブジェクトと運動連鎖構造の衝突を検出、分離、識別することである。これに関連して、衝突検出とは、特に、ロボットの特定のトポロジー部分で衝突が発生しているかどうかを示す多数の二値信号を生成することを意味する。分離は、衝突 i の接触位置$r_{C.i}$を見つけることを意味する。識別は、一般化外部関節力τ_{ext}および外部接触レンチ$F_{ext,i}$の推定を目的としている。要約すると、目的は、すべての接触位置、対応する接触レンチを見つけ、運動連鎖構造のどの部分が特定の時間に衝突しているかを知ることである。

【００１０】

特に、以下の測定量について、測定および／または推定値は次のように提供される：
-ベース方位$\varphi_B(t)$およびベース速度$\dot{x}(t)_B$：好ましくは、ジャイロスコープおよび／またはカルマン推定器で取得する；
-リンクの場合：τ_m：力／トルクセンサおよび力／トルクセンサ付きの$F_{ext,i}$で；
-エンドエフェクタの場合：$F_{ext,i}$：力/トルクセンサで；

【００１１】

すべての接触によって生成される一般化外力τ_{ext}の推定値$\hat{\tau}_\epsilon$は、運動量オブザーバの助けを借り、固有受容データとモデルの少なくとも１つに基づいて取得される。非特許文献[4]、[5]、[7]からの一般化された運動量オブザーバが適用されることが望ましく、これは、

$$\hat{\tau}_\epsilon = K_O = (M(q)\dot{q} - \int_0^t [\tau_m - \gamma(q,\dot{q}) + \hat{\tau}_\epsilon]\, d\tilde{t}) \qquad 式（４）$$

と定義される。

【００１２】

これは、運動連鎖構造に作用する一般化外力の推定値$\hat{\tau}_\epsilon$を生成し、ここで、$K_O = diag\{k_{O,i}\} > 0$はオブザーバゲイン行列であり、$\dot{M}(q) - 2C(q,\dot{q})$の歪対称性のため、

$$\gamma(q,\dot{q}) := n(q,\dot{q}) - \dot{M}(q)\dot{q} = g(q) + C(q,\dot{q})\dot{q} - \dot{M}(q)\dot{q} = g(q) - C^T(q,\dot{q})\dot{q} \qquad 式（５）$$

である、非特許文献[3]参照。理想的な条件下で$q, \dot{q}, M(q), C(q,\dot{q}), g(q)$は正確に知られており、オブザーバのダイナミクスは分離され、すべての成分$\hat{\tau}_\epsilon$は一次のダイナミクス：

$$K_O^{-1}\dot{\hat{\tau}}_\epsilon + \hat{\tau}_\epsilon = \tau_{ext} \qquad 式（６）$$

に従う。故に、$\hat{\tau}_\epsilon$は単に、τ_{ext}の一次フィルターバージョンである。

【００１３】

接触レンチと位置の最大数を決定できるようにするため、非特許文献[21]に示すように、観測された一般化外部関節力$\hat{\tau}_\epsilon$からの力／トルクセンサの情報は除外されることが好ましい。したがって、各センサに取り付けられた慣性によって生成される動的および静的な力が補正される。この補正には、重心Dのデカルト空間$\ddot{x}_D$の加速度が必要である。好ましくは、

$$\ddot{x}_D = \begin{pmatrix}\ddot{r}_D \\ \dot{\omega}_D\end{pmatrix} = J_D\ddot{q} + \dot{J}_D\dot{q} \qquad 式（７）$$

で計算され、ここで、J_Dは点Dのヤコビアンである。このため、デカルト加速度を計算するには一般化加速度$\ddot{q}$が必要である。$\ddot{q}$の推定値$\hat{\ddot{q}}$は、式（４）に示すように外乱オブザーバを拡張することで取得できる。その内部状態、つまり一般化運動量$p = M(q)\dot{q}$を使用して、時間微分の推定値：

$$\hat{\dot{p}} = M(q)\hat{\ddot{q}} + \dot{M}(q)\dot{q} = \tau_m - \gamma(q,\dot{q}) + \hat{\tau}_\epsilon \qquad 式（８）$$

に従う。これから、推定加速度は：

$$\hat{\ddot{q}} = M(q)^{-1}(\hat{\dot{p}} - \dot{M}(q)\dot{q}) = M(q)^{-1}(\tau_m - n(q,\dot{q}) + \hat{\tau}_\epsilon) \qquad 式（９）$$

として従う。

【００１４】

加速誤差$e=\ddot{q}-\hat{\ddot{q}}$のダイナミクスは、式（８）を使用して導出される：

$$\begin{aligned} e &= M(q)^{-1}(\dot{p}-\dot{M}(q)\dot{q})-M(q)^{-1}(\hat{\dot{p}}-\dot{M}(q)\dot{q}) \\ &= M(q)^{-1}(\tau_m-n(q,\dot{q})+\tau_{ext}-(\tau_m-n(q,\dot{q})\hat{\tau}_\epsilon)) \\ &= M(q)^{-1}(\tau_{ext}+\hat{\tau}_\epsilon) \end{aligned}$$ 式（１０）

【００１５】

式（６）および式（１０）のラプラス変換を使用し、次のダイナミクスが取得される：

$$e=M(q)^{-1}\left(\frac{sk_{O,1}^{-1}\tau_{ext,1}}{1+sk_{O,1}^{-1}}\ldots\frac{sk_{O,n}^{-1}\tau_{ext,n}}{1+sk_{O,n}^{-1}}\right)^T$$ 式（１１）

【００１６】

エラーダイナミクスは、τ_{ext}によってトリガーされる線形ダイナミクスを持つベクトルで構成され、τ_{ext}は、逆質量行列によってエラーeに非線形的に結合される。以下に示すように、好ましくは推定値$\hat{\ddot{q}}$を使用して式（７）に従って$\ddot{x}_D$、したがって外部レンチF_{ext}を取得することができる。

【００１７】

推定外部レンチ$\hat{F}_{ext,S,i}$を取得するための$\hat{\ddot{x}}_D$に基づく剛体ダイナミクス効果および重力効果に対する測定された一般化外力F_Sの補正は、次のように行うことが好ましい：

エンドエフェクタに隣接するボディからのフリーボディ抜粋を考慮して、ニュートンの第二法則は、このボディに取り付けられたセンサを生成する：

$$m_D\ddot{r}_D=m_dg+f_{ext}-f_S$$ 式（１２）

ここで、m_Dは体質量であり、その慣性テンソルはI_Dである。一般に、センサで測定される重力および動的な力があるが、動的な力は式（１２）の左側に表示される。感知された外力については次のとおりである：

$$\bar{f}_{ext,S}=f_S+m_D\ddot{r}_D-m_dg$$ 式（１３）

【００１８】

式（１３）は、センサが純粋な外力のみを測定するのではなく、一般に重力と慣性による力も測定することを示している。したがって、F_Sは、真の外部レンチを取得するために、これらのダイナミクスによって修正される。外部モーメントを取得するために、剛体運動のオイラーの法則が体の重心Dに適用される：

$$I_D\dot{\omega}_D+\omega_D\times I_d\omega_D=m_{ext,E}-m_S-r_{DS}\times f_S+r_{DE}\times f_{ext}$$ 式（１４）

これは、感知された外部モーメント

$$m_{ext,S}:=m_{ext,E}+r_{SE}\times f_{ext}=m_S+I_D\dot{\omega}_D+\omega_D\times I_D\omega_D+r_{DS}\times(f_s-f_{ext})$$ 式（１５）

につながる。

【００１９】

式（１３）および式（１４）は、外部レンチ

$$\bar{F}_{ext,S} = \begin{pmatrix} \bar{f}_{ext,S} \\ \bar{m}_{ext,S} \end{pmatrix} = F_S + \begin{pmatrix} m_D I_3 & 0 \\ m_D S(r_{SD}) & I_D \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} \ddot{r}_D \\ \dot{\omega}_D \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} g \\ 0 \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_D \times I_D \omega_D \end{pmatrix}$$ 式（１６）

になる。式（１６）では、I_3は３次元単位行列、gはデカルト重力ベクトル、r_{SD}はセンサに取り付けられた慣性の重心からセンサへのベクトル、および0は対応サイズのゼロ行列である。S演算子は、引数を持つ外積を表す歪対称性行列を示す。すべてのエンティティはワールドフレームで表わされる。$\ddot{q}$の代わりに$\hat{\ddot{q}}$を使用して$\hat{\ddot{x}}_D$を計算すると、S点の推定外部レンチは次のように取得できる：

$$\hat{F}_{ext,S} = F_S + \begin{pmatrix} m_D I_3 & 0 \\ m_D S(r_{SD}) & I_D \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} \ddot{r}_D \\ \dot{\omega}_D \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} g \\ 0 \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_D \times I_D \omega_D \end{pmatrix}$$ 式（１７）

【００２０】

センサが運動連鎖の遠位端にないリンクにある場合、運動連鎖のセンサに従う各ボディbの補正レンチは、

$$F_{c.b} = \begin{pmatrix} m_{D.b} I_3 & 0 \\ m_{D.b} S(r_{SD.b}) & I_{D.b} \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} \ddot{r}_{D.b} \\ \dot{\omega}_D \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} g \\ 0 \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_{D.b} \times I_{D.b} \omega_{D.b} \end{pmatrix}$$ 式（１８）

となり、すべてのbは前記の補正のために合計される。この操作は、マルチボディダイナミクスを計算するためのニュートンオイラー法に対応している。故に、この場合、外部レンチは特に

$$\hat{F}_{ext,S} = F_S + \sum_{b \in N(b_S)} F_{c,b} =: F_S + F_{cmp,S}$$

式（１９）

により得られる。

【００２１】

式（１９）では、$N(b_S)$は、運動連鎖においてセンサを保持する遠位方向の肢b_Sに従うボディのセットを示す。

【００２２】

以下では、ヤコビアン$J^T_{S.distal.i}$変換された$F_{ext,S.distal.i}$に対して$\hat{\tau}_\epsilon$を補正して、予期しない衝突から発生する一般化関節力の推定$\hat{\tau}_{ext,col}$を得るための好ましい方法が表示される。

【００２３】

特に、一般化接触力の推定および衝突検出のために、オブザーバがすべての外部接触から生じる一般化外部関節力を検出することが考慮される。ヒューマノイドの場合と同様に、一般的に常に望ましい接触がある（操作中の足や手など）。これらの接触力は、観測された一般化関節力からの除外を可能にし、望ましくない衝突検出（「誤報」）を回避するために、対応するエンドエフェクタ（手首や足首など）に近い力／トルクセンサで測定する必要がある。好ましくは、力／トルクセンサ$S_{distal,i}$は、ヒューマノイドロボットの腕と脚の遠位リンクの運動連鎖構造に取り付けられている。予期しない衝突$\tau_{ext,col}$に起因する一般化関節力の推定値を取得するために、遠位リンクの外部レンチによって生成される一般化外部関節力を、観測された一般化関節力から差し引くことが好ましい：

$$\hat{\tau}_{ext,col} = \hat{\tau}_{\epsilon} - \sum_{S.distal} J^{T}_{S.distal,i} F_{ext,S.distal,i}$$

式（２０）

【００２４】

力／トルクセンサが補正され、所望の一般化外力が観察された一般化外力から除外されたので、衝突検出は以下のように行われることが好ましい。

【００２５】

衝突検出は、一般化関節力と推定外部レンチを使用した閾値処理によって行われることが好ましく、すなわち好ましくは、次の条件（要素ごとにチェックされている）の少なくとも１つが満たされている場合である：

$$\hat{\tau}_{ext,col} > \tau_{thresh}$$
$$\hat{F}_{ext,S.i} > F_{S.i,thresh}$$

式（２１）

【００２６】

本発明の利点は、ヒューマノイドロボットの加速度推定および負荷補正のための新しい実時間法が、ロボットの運動連鎖構造上に任意に配置された力／トルクセンサに提供されることである。

【００２７】

30

本発明の利点は、ヒューマノイドロボットの加速度推定および負荷補正のための新しい実時間法が、ロボットの運動連鎖構造上に任意に配置された力／トルクセンサに提供されることである。

【００２８】

好ましくは、式（１９）に基づいて、運動連鎖（例えば、各関節）内の複数のセンサについて、この実施形態によれば、補正レンチは、複数の計算を回避するために再帰的に計算される。好ましくは、これは、ここに擬似コードで書かれた以下のアルゴリズムに従って行われる：

function $F_{cmp,S}$= calculate_F_cmp(S)

begin

$F_{cmp,S} := 0$

for *all bodies b directly following S* **do**

$\ddot{x}_{D.b} = J_{D.b}\ddot{q} + \dot{J}_{D.b}\dot{q}$

$F_{cmp,S} += \begin{pmatrix} m_{D.b}I_3 & 0 \\ m_{D.b}S(r_{SD.b}) & I_{D.b} \end{pmatrix}(\hat{\ddot{x}}_{D.b} - \begin{pmatrix} g \\ 0 \end{pmatrix}) + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_{D.b} \times I_{D.b}\omega_{D.b} \end{pmatrix}$

end

for *all* $T \in N(S)$ **do**

$F_{cmp,T}$=calculate_F_cmp(T)

$F_{cmp,S} += F_{cmp,T} + \begin{pmatrix} 0 \\ r_{ST} \times f_{ext,T} \end{pmatrix}$

end

end

【００２９】

このアルゴリズムは、$N(S)$セットを使用し、これは、遠位方向でSに直接従うすべてのセンサを示す。直接とは、Sと$N(S)$の要素の２つを接続する運動連鎖の間に他のセンサがないことを意味する。

【００３０】

この実施形態の利点は、複数の計算を回避することである。

【００３１】

本発明の別の実施形態によれば、この方法はさらに以下のステップを含む：

- 衝突の$r_d = (S^T(f_i))^{\#}m_i$で、力の作用線$r_d + \lambda f_i/||f_i||$を計算し、および、力の作用線と運動連鎖構造のジオメトリを交差させることで、運動連鎖構造との衝突の接触位置r_Cを決定する。

【００３２】

式（２１）の情報は、接触位置を大まかに推定するためにも使用されることが好ましい。閾値を超える最後の関節またはセンサと、それを超えない次のセンサとの間で接触は常に位置決め可能である。接触しているリンクに関する詳細情報を取得するには、外部レンチ$F_{ext,i}$が必要である。以下に、$F_{ext,i}$を取得する好ましい方法と、それを衝突分離に使用する方法を示す：

【００３３】

30

一般に、外部モーメントがロボットに沿って作用する場合、衝突分離は処理できない。この場合、追加的に作用する接触力の接触位置を正確に特定することはできない。故に、分離の場合、ここではロボットに外部モーメントは作用していないと想定され$(m_{ext,E}=0)$、これは、ほとんどの望ましくない衝突状況の現実的な仮定である。分離は、次の４段階のアプローチを介して行われる：
ａ）接触リンクを分離し、
ｂ）それぞれの接触リンクに作用する外部レンチを推定し、
ｃ）推定される力の作用線を計算し、および
ｄ）作用線を既知の運動連鎖構造ジオメトリと交差させて、正確な接触点を決定する。

【００３４】
ステップｂ）とｃ）の場合、２つの主要なシナリオを区別する必要がある：単一接触と多接触のシナリオである。単一接触シナリオは、関節トルク感知でのみ処理できるが、多接触シナリオでは、異なる接触を区別するために追加の力／トルクセンサが必要になる場合がある。
【００３５】
ステップａ）に関して：接触リンクは、例えば、上腕での接触は手首にトルクを生成できないという、運動連鎖に沿った接触位置の後ろに現れる関節で接触がトルクを生成できないという事実に基づいて見つけることができる。故に、関節 j がリンク j をロボットの先行リンクに接続するという規則が与えられている場合、接触リンクインデックス ｉ は

$$i = max\{j\,|\,\tau_{ext,col,j}\neq 0\}\qquad 式（２２）$$

で分離する事ができる。ヒューマノイドのツリー構造により、この手順は複数の潜在的な接触リンクにつながる可能性がある。また、モデリングと測定の誤差により、式（２２）は閾値処理の対象となることに注意する必要がある。また、いくつかの力、例えば作用するリンクに接続された関節の軸に平行な力は、この関節でトルクを生成しない。これは、接触リンクの誤った推定につながる可能性がある。ただし、この問題は、後で導入する修正手順で対処できる。

【００３６】
ステップｂ）に関して：接触リンクが見つかった場合、それぞれのリンクに作用するレンチF_iは、J_i^Tのムーア・ペンローズの疑似逆行列$(J_i^T)^{\#}$を使用し、

$$F_i=(J_i^T)^{\#}\tau_{ext,col}\qquad 式（２３）$$

として好ましくは推定される。

【００３７】

40

ステップｃ）に関して：接触位置r_Cで作用する単一の外部レンチ$F_{ext,}$の場合、レンチF_iは次のように表される：

$$F_i = J_{c,i} F_{ext} = (\begin{matrix} I_3 & 0 \\ S^T(r_C) & I \end{matrix}) F_{ext}$$ 式（２４）

外部モーメントが存在しないという仮定を想起すると、

$$F_i = (\begin{matrix} f_i \\ M_i \end{matrix}) = (\begin{matrix} f_{ext} \\ S(r_C) f_{ext} \end{matrix}) = (\begin{matrix} f_i \\ S^T(f_i) r_c \end{matrix})$$ 式（２５）

という結果になる。
式（２５）から、力の作用線が導き出される。$\lambda \in \mathbb{R}$で$r_d + \lambda f_i / ||f_i||$によって記述され、

$$r_d = (S^T(f_i))^{\#} m_i$$ 式（２６）

である。

【００３８】
ステップｄ）に関して：疑似逆行列の特性と歪対称行列のランク不足のため、r_dは力の作用線に沿った点であり、原点に最も近く、したがってr_Cとは一般的に同一ではない。力の作用線を接触リンクのリンクジオメトリと交差させることにより、r_Cを計算することができる。この交点問題に複数の解がある場合、最小のパラメータλをもつ解が選択される。これは、予期しない衝突の場合には最も一般的な押圧力が予想されるためである。ただし、より高度な抽象度でより高度な処理が行われる場合、すべての候補を生成して利用できる。接触リンクが正しく推定されない場合でも、ベースムーブメントはそれを決定するのに十分な情報を提供するため、単一接触ケースの接触点r_Cを計算できる。この場合、作用線は、推定される接触リンクと交差しないことがある。故に、接触点r_Cは、好ましくは、作用線を後続のリンクとも交差させることにより正しく決定される。複数接触の場合、上記の方法は、力／トルク感知と組み合わせて使用することが好ましい。次に、各センサに対して、センサの補正された（式（１９）のように）レンチ$\hat{F}_{ext,i}$にステップ３および４を適用することにより、センサに従う運動連鎖の接触が好ましくは検出される。運動連鎖に複数のセンサと複数の接触がある場合、運動連鎖の遠位端に近いセンサによって既に測定された接触から生じるレンチは、連鎖の早い段階で接触を正しく推定するため、測定されたレンチから差し引かれる必要がある。

$$\hat{F}_{ext,i} = \hat{F}_{ext,Si} - \sum_{T \in N(S)} (\hat{F}_{ext,T} + (\begin{matrix} 0 \\ r_{ST} \times \hat{f}_{ext,T} \end{matrix}))$$ 式（２７）

【００３９】
力／トルクセンサがない場合、複数接触の正しい分離は、接触リンクが正しく推定され、ベースから十分離れている場合にのみ可能であり、つまり、接触リンクのヤコビアンには、推定するレンチごとに少なくとも６つの自由度が含まれている。このために、好ましくは、接触レンチは、ヤコビアンをスタックし、疑似逆行列

$$(F_{i.1}^T \ldots F_{i.n}^T)^T = (J_{i.1}^T \ldots J_{i.n}^T)^{\#} \tau_{ext,col}$$ 式（２８）

を計算することで計算される。

【００４０】

40

50

ヤコビアンの特異点の場合、レンチを正しく推定するために追加の自由度が必要になる場合がある。その後、ステップｃ）およびｄ）を各推定レンチ$F_{i,j}$に適用できる。このステップは、非特許文献[14]の式（６）の一般化と見なすことができる。

【００４１】
これにより、接触位置r_Cが特定される。

【００４２】
この実施形態の利点は、特にヒューマノイドロボットの単一接触シナリオにおける接触位置および接触力を推定するための新規な方法が提供されることである。

10

【００４３】
本発明の別の実施形態によれば、この方法はさらに以下のステップを含む：
- 決定された接触位置r_Cに基づいて、完全な接触ヤコビアン$J_{C.i}=J_{c,i}J_i$を決定し、
- 外部レンチ：$(F^T_{ext,1}\cdots F^T_{ext,n})^T=(J^T_{C.1}\cdots J^T_{C.n})^{\#}\tau_{ext,col}$を決定する。

【００４４】
上記により、接触位置r_Cが決定されるため、完全な接触ヤコビアン

$$J_{C.i}=J_{c,i}J_i \qquad \text{式（２９）}$$

が好ましくは計算される。式（２８）と同様に、外部レンチ

$$(F^T_{ext,1}\cdots F^T_{ext,n})^T=(J^T_{C.1}\cdots J^T_{C.n})^{\#}\tau_{ext,col} \qquad \text{式（３０）}$$

を識別するために使用されることが好ましい。

【００４５】
力／トルクセンサで特定されたレンチの場合、修正されたレンチは既に最良の推定値であるため、このステップでアクションを実行する必要はない。

【００４６】

30

この実施形態の利点は、上記の発明およびその実施形態の拡張が、運動連鎖における追加の力／トルクセンサの助けを借りて、および助けなしで、多接触状況に提供されることである。

【００４７】
本発明の別の実施形態によれば、この方法はさらに以下のステップを含む：
- r_Cおよび$(F^T_{ext,1}\cdots F^T_{ext,n})^T$に依存するロボットの制御。

【００４８】
本発明の別の実施形態によれば、ロボットはヒューマノイドロボットである。

【００４９】

40

本発明の別の態様は、データ処理ユニットを有するコンピュータシステムに関し、データ処理ユニットは、先行する請求項のうち１つに記載の方法を実行するように設計および設定される。

【００５０】
本発明の別の態様は、電子的に読み取り可能な制御信号を備えたデジタルデータストレージに関し、制御信号は、プログラム可能なコンピュータシステムと共働することができ、それにより、先行する請求項のうち１つに記載の方法が実行される。

【００５１】
本発明の別の態様は、プログラムコードがコンピュータシステム上で実行される場合、先行する請求項のうち１つに記載の方法を実行するための機械可読媒体に格納されたプロ

50

グラムコードを含むコンピュータプログラムプロダクトに関する。

【００５２】

本発明の別の態様は、コンピュータプログラムがコンピュータシステム上で実行される場合、先行する請求項のうち１つに記載の方法を実行するためのプログラムコードを有するコンピュータプログラムに関する。

【００５３】

本発明の別の態様は、少なくとも１つの運動連鎖を含む運動連鎖構造を有するロボットに関し、運動連鎖構造は、ベース、リンク、リンクを接続する関節、アクチュエータ、および少なくとも１つのエンドエフェクタ、力／トルクを測定／推定するため少なくとも１つの運動連鎖の最遠位リンクにあるセンサ$S_{distal,i}$、および固有受容データを測定／推定するためのセンサS_iで構成され、センサS_iは運動連鎖構造に沿って任意に配置され、ロボットは先行する請求項に記載の方法を実行するように設計および設定されている。

【００５４】

本発明の別の実施形態によれば、ロボットは、データネットワークとのデータインターフェースを備え、ロボットは、データネットワークからロボットを設定および制御するためのシステムプログラムをダウンロードするように設計および設定される。

【００５５】

本発明の別の実施形態によれば、ロボットは、データネットワークからシステムプログラムのパラメータをダウンロードするように設計および設定される。

【００５６】

本発明の別の実施形態によれば、ロボットは、ローカル入力インターフェースおよび／またはティーチインプロセスを介してシステムプログラムのパラメータを入力するように設計および設定され、ロボットは手動で誘導される。

【００５７】

本発明の別の実施形態によれば、ロボットは、データネットワークからのシステムプログラムおよび／またはそれぞれのパラメータのダウンロードが遠隔基地によって制御されるように設計および設定され、遠隔基地はデータネットワークの一部である。

【００５８】

本発明の別の実施形態によれば、ロボットは、ロボットでローカルに利用可能なシステムプログラムおよび／またはそれぞれのパラメータが、データネットワークから受信したそれぞれの要求に基づいてデータネットワークの１人以上の参加者に送信されるように設計および設定される。

【００５９】

本発明の別の実施形態によれば、ロボットは、ロボットでローカルに利用可能なそれぞれのパラメータを有するシステムプログラムが遠隔基地から開始できるように設計および設定され、遠隔基地はデータネットワークの一部である。

【００６０】

本発明の別の実施形態によれば、ロボットは、遠隔基地および／またはローカル入力インターフェースが、システムプログラムおよびそれぞれのパラメータの入力のためおよび／または多数のシステムプログラムとそれぞれのパラメータからシステムプログラムとそれぞれのパラメータを選択するために設計および設定されたヒューマンマシンインターフェースＨＭＩを含むように設計および設定される。

【００６１】

本発明の別の実施形態によれば、ヒューマンマシンインターフェースＨＭＩは、タッチスクリーンでの「ドラッグアンドドロップ」入力を介して、誘導ダイアログ、キーボード、コンピュータマウス、触覚インターフェース、仮想現実インターフェース、拡張現実インターフェース、音響インターフェース、身体追跡インターフェースを介して、筋電データに基づいて、脳波データに基づいて、神経インターフェースを介して、またはそれらの組み合わせを介してエントリが可能になるように設計および設定される。

【００６２】
　本発明の別の実施形態によれば、ヒューマンマシンインターフェースＨＭＩは、聴覚的、視覚的、触覚的、嗅覚的、触知的、または電気的フィードバック、またはそれらの組み合わせを提供するように設計および設定される。
【００６３】
　本発明は、上記の実施形態を参照して上記で説明されている。しかし、本発明がこれらの実施形態に限定されるだけでなく、発明思想および特許請求の範囲の精神および範囲内のすべての可能な実施形態を含むことは明らかである。
【図面の簡単な説明】
【００６４】
【図１】図１は、本発明の一実施形態によるロボットの衝突処理方法を示す。
【図２】図２は、本発明の別の実施形態によるロボットの衝突処理方法を示す。
【図３】図３は、本発明の別の実施形態によるヒューマノイドロボットを示す。
【図４】図４は、図１に示した方法の詳細な抜粋を示す。
【図５】図５は、図２の方法の別の説明を示す。
【発明を実施するための形態】
【００６５】
　図１は、少なくとも１つの運動連鎖を含む運動連鎖構造を有するロボット１の衝突処理方法を示し、運動連鎖構造は、ベース、リンク、リンクを接続する関節、アクチュエータおよび少なくとも１つのエンドエフェクタ、力／トルクを測定／推定するため少なくとも１つの運動連鎖の最も遠位のリンクにあるセンサ $S_{distal.i}$、および固有受容データを測定／推定するためのセンサ S_i で構成され、センサ S_i は、運動連鎖構造に沿って任意に配置され、この方法は、
　-　ロボット１のダイナミクスを記述するモデルを提供Ｓ１し、
　-　少なくとも１つの運動連鎖の最も遠位のリンクで、センサ $S_{distal.i}$ で力／トルク $F_{ext,S.distal.i}$ を測定および／または推定Ｓ２し、
　-　センサ S_i により固有受容データ：ベースおよびロボットの一般化座標 $q(t)$ およびそれらの時間微分 $\dot{q}(t)$、一般化関節モーター力 τ_m、外力 F_S、ベース方位 $\varphi_B(t)$ およびベース速度 $\dot{x}(t)_B$、を測定および／または推定Ｓ３し、
　-　固有受容データおよびモデルの少なくとも１つに基づいて、運動量オブザーバ３で一般化外力 τ_{ext} の推定値 $\hat{\tau}_\epsilon$ を生成Ｓ４し、
　-　$\hat{\tau}_\epsilon$ および τ_m に基づいて、ベースおよびロボットの一般化座標 $\ddot{q}(t)$ の２次導関数の推定値 $\hat{\ddot{q}}(t)$ を生成Ｓ５し、
　-　$\hat{\ddot{q}}(t)$ に基づいて、運動連鎖構造上の点 D のデカルト加速度 $\hat{\ddot{x}}_D$ を推定Ｓ６し、
　-　推定外部レンチ $\hat{F}_{ext,S.i}$ を取得するため、$\hat{\ddot{x}}_D$ に基づく剛体力学効果および重力効果に対して F_S を補正Ｓ７し、
　-　予期しない衝突から生じる一般化関節力の推定 $\hat{\tau}_{ext,col}$ を取得するため、ヤコビアン $J^T_{S.distal.i}$ 変換された $F_{ext,S.distal.i}$ に対して $\hat{\tau}_\epsilon$ を補正Ｓ８し、および、
　-　$\hat{\tau}_{ext,col} > \tau_{thresh}$ および／または $\hat{F}_{ext,S.i} > F_{S.i,thresh}$ の場合、与えられた閾値 τ_{thresh} および $F_{S.i,thresh}$ に基づいて衝突を検出するＳ９、
　ステップを含む。

【００６６】

図２は、少なくとも１つの運動連鎖を含む運動連鎖構造を有するロボット１の衝突処理方法を示し、運動連鎖構造は、ベース、リンク、リンクを接続する関節、アクチュエータおよび少なくとも１つのエンドエフェクタ、力／トルクを測定／推定するため少なくとも１つの運動連鎖の最も遠位のリンクにあるセンサ $S_{distal.i}$、および固有受容データを測定／推定するためのセンサ S_i で構成され、センサ S_i は、運動連鎖構造に沿って任意に配置され、この方法は、

- ロボット１のダイナミクスを記述するモデルを提供Ｓ１し、
- 少なくとも１つの運動連鎖の最も遠位のリンクで、センサ $S_{distal.i}$ で力／トルク $F_{ext,S.distal.i}$を測定および／または推定Ｓ２し、
- センサ S_i により固有受容データ：ベースおよびロボットの一般化座標$q(t)$およびそれらの時間微分$\dot{q}(t)$、一般化関節モーター力τ_m、外力F_S、ベース方位$\varphi_B(t)$およびベース速度$\dot{x}(t)_B$、を測定および／または推定Ｓ３し、
- 固有受容データおよびモデルの少なくとも１つに基づいて、運動量オブザーバ３で一般化外力τ_{ext}の推定値$\hat{\tau}_\epsilon$を生成Ｓ４し、
- $\hat{\tau}_\epsilon$およびτ_mに基づいて、ベースおよびロボットの一般化座標$\ddot{q}(t)$の２次導関数の推定値$\hat{\ddot{q}}(t)$を生成Ｓ５し、
- $\hat{\ddot{q}}(t)$に基づいて、運動連鎖構造上の点Dのデカルト加速度$\hat{\ddot{x}}_D$を推定Ｓ６し、
- 推定外部レンチ$\hat{F}_{ext,S.i}$を取得するため、$\hat{\ddot{x}}_D$に基づく剛体力学効果および重力効果に対してF_Sを補正Ｓ７し、
- 予期しない衝突から生じる一般化関節力の推定$\hat{\tau}_{ext,col}$を取得するため、ヤコビアン$J_{S.distal.i}^T$変換された$F_{ext,S.distal.i}$に対して$\hat{\tau}_\epsilon$を補正Ｓ８し、および、
- $\hat{\tau}_{ext,col} > \tau_{thresh}$および／または$\hat{F}_{ext,S.i} > F_{S.i,thresh}$の場合、与えられた閾値$\tau_{thresh}$および$F_{S.i,thresh}$に基づいて衝突を検出Ｓ９し、
- 衝突の$r_d = (S^T(f_i))^{\#} m_i$で、力の作用線$r_d + \lambda f_i / || f_i ||$を計算し、および力の作用線と運動連鎖構造のジオメトリを交差させることで、運動連鎖構造との衝突の接触位置r_Cを決定Ｓ１０し、
- 決定された接触位置r_Cに基づいて、完全な接触ヤコビアン$J_{C.i} = J_{c,i} J_i$を決定Ｓ１１し、
- 外部レンチ：$(F_{ext,1}^T \cdots F_{ext,n}^T)^T = (J_{C.1}^T \cdots J_{C.n}^T)^{\#} \tau_{ext,col}$を決定Ｓ１２し、および、
- r_Cおよび$(F_{ext,1}^T \cdots F_{ext,n}^T)^T$に依存するロボットを制御Ｓ１３する、

ステップを含む。

【００６７】

図３は、ベースBと運動連鎖としての腕と脚を備えたヒューマノイドロボット１を示し、ベース方位は$\varphi_B(t)$で示され、ベース速度は$\dot{x}(t)_B$で示される。ヒューマノイドロボット１は、複数の接触状態にある。一般化外力$F_{ext,i}$は、その構造全体に作用している。足にかかる力は移動に起因し、手にかかる力は操作に起因する。他の外力は、不要な衝突によって引き起こされる。また、多数の力／トルクセンサS_i（図３の場合は５つ）は、ロボット１の運動連鎖構造に沿って任意に配置されている。２つの接触が右腕で検出される。１つの接触がS_1の背後にあり、もう１つの接触がS_3とS_1の間にある限り、ひとつはセンサS_3によるもの、もうひとつはセンサS_1によるものである。これは$F_{ext,2}$および$F_{ext,5}$の場合であるため、これら２つのレンチは正しく推定される。(それ以外の場合、望ましい手順は式（２８）で示される)。

【００６８】

図４は、図１に示した方法の詳細な抜粋を示している。式（４）の観測された一般化関節力からの、力／トルクセンサS_iによって測定された遠位リンク$F_{ext,S.distal.i}$での外部レンチの除外は、上記の概要で行われる。したがって、これらのレンチは、上記の概要から式（１９）に従って補正され、オブザーバ３から$F_{S.distal.i}$と$\hat{q},\hat{\dot{q}}$を受信している四角に象徴される負荷補償で$F_{S.distal.i}$から$F_{ext,S.distal.i}$へのマップを可能にする。他のすべての表記法と手順は、図１に対応する記述の下で説明されている。$F_{S.distal.i}$を出力する右上の点線のブロックはフィルターである。

【００６９】

図５は、図２で説明したステップの異なる図を示し、衝突検出の分離および識別アルゴリズムの概要を示す。したがって、図２の説明で参照されるすべてのステップＳ１…Ｓ１３は、図５にも適用できる。さらに、上記の概要、特に式（１７）～式（１９）が適用できる。使用される感知または推定または生成された情報が多いほど、衝突検出からより多くの情報を取得できる。衝突検出が$\tau_{ext,col}$のみに基づいている場合、接触の位置を十分に突き止めることはできない。$F_{ext,S.i}$がさらに使用される場合、接触位置は、検出センサと次のセンサの間にあるロボットの部品に特定できる。完全な$F_{ext,S.i}$が使用可能な場合、リンクごとに衝突検出を実行できる。

【符号の説明】

【００７０】

20

１：ロボット
３：オブザーバ
Ｓ１：提供
Ｓ２：測定および／または推定
Ｓ３：測定および／または推定
Ｓ４：生成
Ｓ５：生成
Ｓ６：推定
Ｓ７：補正
Ｓ８：補正

30

Ｓ９：検出
Ｓ１０：決定
Ｓ１１：決定
Ｓ１２：決定
Ｓ１３：制御

【図１】

S1

S2

S3

S4

S5

S6

S7

S8

S9

Fig. 1

【図２】

S1

S2

S3

S4

S5

S6

S7

S8

S9

S10

S11

S12

S13

Fig. 2

【図３】

Fig. 3

【図４】

Fig. 4

【図５】

S1,....,S5
$\tau_{ext,col}$
$F_{cmp,S.i}$
S10
S6,S7
$r_{C.i}$
$F_{ext,i}$
S11,S12
S10
$F_{ext,i}, r_{C.i}$
S9,S13
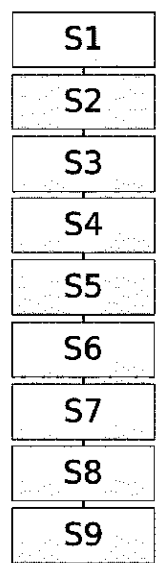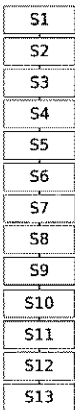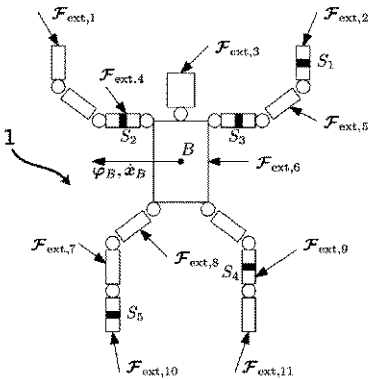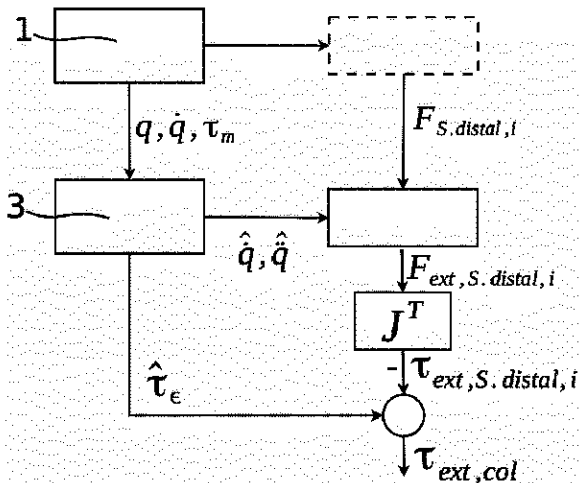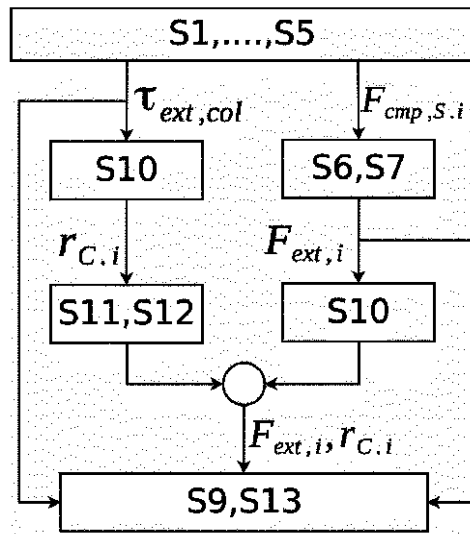
Fig. 5

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2018/064075

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. B25J9/16
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
B25J G05B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JONATHAN VORNDAMME ET AL: "Collision detection, isolation and identification for humanoids", 2017 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), 28 May 2017 (2017-05-28), pages 4754-4761, XP055502567, DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989552 ISBN: 978-1-5090-4633-1 page 4754 - page 4761 -----	1-20

-/--

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C. [ ] See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
10 September 2018	01/10/2018

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	De Santis, Agostino

2

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2018/064075

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
L	Anonymous: "Program and Proceedings -Cloud Platform and Mobile App ¦ ICRA 2017 ¦ IEEE International Conference on Robotics and Automation 2017", , 5 September 2018 (2018-09-05), XP055504706, Retrieved from the Internet: URL:http://www.icra2017.org/conference/proceedings [retrieved on 2018-09-05] page 1 -----	1-6,11
L	Anonymous: "Registration ¦ ICRA 2017 ¦ IEEE International Conference on Robotics and Automation 2017", , 21 May 2017 (2017-05-21), XP055502694, Retrieved from the Internet: URL:https://web.archive.org/web/20170521030029/http://www.icra2017.org/registration-and-travel/registration [retrieved on 2018-08-28] page 1 -----	1-6,11
A	K. BOUYARMANE; A. KHEDDAR: "On the dynamics modeling of free-floating-base articulated mechanisms and applications to humanoid whole-body dynamics and control", HUMANOIDS, 29 November 2012 (2012-11-29), XP002784551, cited in the application the whole document -----	3
A	FLACCO FABRIZIO ET AL: "Residual-based contacts estimation for humanoid robots", 2016 IEEE-RAS 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANOID ROBOTS (HUMANOIDS), IEEE, 15 November 2016 (2016-11-15), pages 409-415, XP033036109, DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2016.7803308 the whole document -----	1-6
A	FILIPPO D'IPPOLITO ET AL: "Contact Estimation in Robot Interaction", INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ROBOTIC SYSTEMS, vol. 11, 1 January 2014 (2014-01-01), pages 1-10, XP055303197, AT ISSN: 1729-8806, DOI: 10.5772/58688 the whole document -----	1-6

2

フロントページの続き

(81)指定国・地域 AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IR,IS,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,SM,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT

Ｆターム(参考) 3C707 JS03 KS33 KS35 MS07 MS15 WA03